

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE ADSORCIÓN MEDIANTE SILICA GEL EN UNA PLANTA PILOTO DE CLIMATIZACIÓN SOLAR

R. Spotorno, A. Busso, J. Pochettino, G. Figueredo, F. Benítez
GITEA - Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Resistencia
French 414. 3500 Resistencia-Chaco. República Argentina
Tel: +54 3722 432928. / Fax: +54 3722 432683/ e.mail: grfigueredo@gmail.com

RESUMEN: Se exponen los resultados experimentales del proceso de adsorción de la humedad del aire en un panel relleno con silica gel. El panel de silica gel es el componente principal de una planta piloto de climatización solar por adsorción humidificación. Para el estudio del proceso de adsorción se registraron los valores de temperatura y humedad relativa del aire a la entrada y salida del dispositivo. Se efectuaron ensayos para caudales de aire comprendido entre 260 kg/h y 1000 kg/h. A efecto de optimizar el funcionamiento del dispositivo se fueron eliminando fugas y entradas de aire logrando obtener variaciones de humedad absoluta del orden de $2,31 \times 10^{-3}$ kg (agua)/kg (aire seco) para un caudal de 1000 kg/h de aire.

Palabras clave: Adsorción, silica gel, climatización

INTRODUCCION

Durante una gran parte del año en el nordeste argentino se hace imprescindible el acondicionamiento del aire para alcanzar niveles de confort adecuados para el normal desarrollo de las actividades humanas en general y laborales en particular. Los procesos convencionales con lo que se acondiciona aire, presentan altos consumos de energía, pueden traer consigo problemas ambientales y en algunos casos incluso lograr dificultades para garantizar aire con la humedad y temperatura de confort. Además requieren compresores, los cuales presentan un alto costo de mantenimiento e inversión. Algunos de estos sistemas utilizan sustancias como los CFC y los HCFC, los cuales están restringidos por el protocolo de Montreal, Builes y Chejne (2004).

El problema radica en la conjunción de temperaturas y humedades elevadas. A fin de obtener rangos de humedades controladas del aire en el sistema de climatización por adsorción-humidificación, el mismo es deshidratado en un dispositivo como se observa en la Fig.1. El proceso de secado se realiza con un material higroscópico, en nuestro caso silica gel, que una vez saturado de humedad es regenerado a través de energía solar y el agua adsorbida es liberada al ambiente.

El clima local y la alta disponibilidad de radiación solar, permiten obtener mediante un colector solar de placa plana temperaturas del orden de los 80°C adecuadas para la regeneración del silica gel.

La adsorción es una operación básica que se realiza poniendo en contacto un sólido con una mezcla fluida. Este proceso es un fenómeno que se da en la superficie y el producto retenido se llama adsorbato. La adsorción viene a estar determinada por una pérdida o disminución de la movilidad de las moléculas de adsorbato. Por eso cuanto menor energía lleven éstas, más fácilmente se adsorberán. Es decir la retención será tanto más fácil cuanto mayor sea el volumen y peso de las moléculas o iones del adsorbato y en cualquier caso cuanto menor sea la temperatura de trabajo Vian y Ocón (1957). En este contexto, un desecante es todo aquel material, ya sea líquido o sólido, que presente una gran capacidad para la absorción de humedad en relación con su propio peso. Los productos desecantes exhiben una afinidad tan fuerte por la humedad que puede extraer vapor de agua directamente del aire circundante.

Uno de los desecantes sólidos más comunes es el silica gel. El silica gel es actualmente uno de los desecantes sólidos más utilizados en la industria debido a sus numerosas ventajas tales como: alta capacidad de adsorción (mas de 40% en peso), estabilidad con la temperatura, propiedades físicas estables, alta resistencia mecánica, baja temperatura de regeneración, bajo precio y disponibilidad en el mercado. La característica más importante del proceso de adsorción de agua por parte de los desecantes es su reversibilidad, mediante regeneración a temperaturas entre 55 y 149 °C, Bula y Juvinao (2004). El aumento en la densidad superficial (g/cm^2) del silica gel permite mayor adsorción de agua en el panel. Después tiende a estabilizarse a medida que se satura. La cantidad de agua retenida también se ve afectada por la velocidad a la cual entra la corriente de aire al panel desecante. Por tanto se puede concluir que la cantidad de agua retenida decae con el aumento de la velocidad del flujo, Bula y Juvinao (2004).

Las primeras ruedas desecantes en desarrollarse fueron las de calor, en las que sólo se intercambia energía sensible. Posteriormente se le agregó un material desecante a la matriz para lograr además un intercambio de calor latente. En la literatura se encuentran algunos modelos que describen las dinámicas de adsorción y de transferencia de calor en las llamadas ruedas de entalpía y las deshumidificadoras. Algunas fueron desarrolladas por (Simonson y Besant 1997; y Builes 2000).

En este proyecto se expone los primeros resultados experimentales del proceso de adsorción de la humedad del aire utilizando silica gel como elemento adsorbente. Dicho proceso es fundamental en un sistema de climatización por adsorción-humidificación.

MATERIALES Y METODOS

Unidad de adsorción/regeneración: La figura 1 muestra el esquema conceptual de la unidad de adsorción-regeneración. La misma consta de un cilindro de 0.64m de diámetro y 1m de alto, construido con chapa galvanizada de 0.00127m de espesor plegada con su correspondiente tapa de cierre (Fig.2). En su interior se aloja una estructura compuesta por dos paneles de silica gel (SG) semicilíndricos contruïdos con chapa perforada de 0.00105 m de espesor, separados por un tabique central hueco metálico relleno con material aislante térmico (poliestireno expandido), para minimizar la transferencia de calor del circuito de regeneración (circuito caliente) al de adsorción (circuito frío). Cada semicilindro posee un espesor de 0.05m y aloja el silica gel como se observa en la fig. 3. Como el ciclo de adsorción fue calculado para funcionar durante una hora aproximadamente, mientras uno de los semicilindros funciona en el proceso de adsorción el restante se encuentra en proceso de regeneración (desorción).

A fin de continuar con el proceso de climatización, mediante una manivela que se observa en la Fig.1., se realiza la rotación de los semicilindros 180°. El panel con SG saturada de humedad pasa al circuito de regeneración y el panel con SG regenerada se ubica en el circuito de adsorción. El aire de proceso ingresa por la parte inferior de la unidad, atraviesa la SG colocada en el panel y deja la unidad por la parte superior de la misma. Cada panel (Adsorción/Regeneración) tiene una capacidad para alojar ~26kg de SG. La SG utilizada es para uso de tipo industrial, con cristales de forma irregular con una densidad media de ~900Kg/m³ y granulometría en el rango de 0.003m - 0.006m.

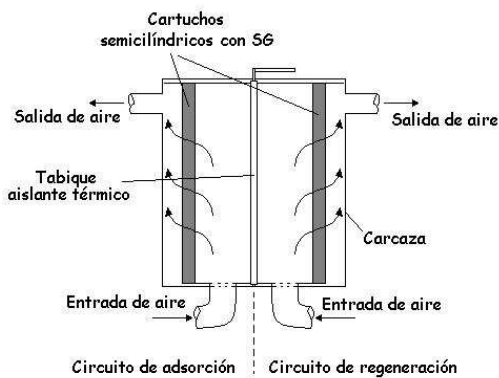


Fig. 1.- Esquema de la unidad de Adsorción-Regeneración



Fig. 2.- foto de la unidad de Adsorción-Regeneración

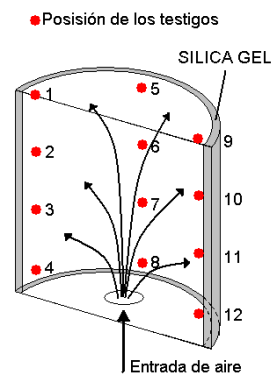


Fig. 3.- Distribución de testigos de SG en el panel

Sistema de medición: Las variables medidas fueron la temperatura y humedad relativa de entrada y salida de la unidad de adsorción, la velocidad media del aire en el circuito se calculó realizándose un promedio a partir de un mapeo de velocidades realizado en una sección de conducto convenientemente seleccionada por uniformidad y posición tal de asegurar un flujo turbulento completamente desarrollado. El valor de la velocidad se utilizó para la determinación del caudal másico en el sistema. Para las mediciones de velocidad de aire se empleó un anemómetro de hilo caliente marca Lutron AM-4204 con una resolución de 0.1 m/s en la escala de operación utilizada y $\pm 5\%$ de precisión. Como sensores de temperatura y humedad se emplearon dos Termo higrómetros marca Dwyer modelo 657 precisión de 3% para HR y de 0.5°C para la temperatura, conectados a un módulo adquirente de datos NUDAM 6018, a su vez conectado a una PC por medio de la interfase RS232 NUDAM 6520. El registro de datos se realizó en forma automática a intervalos de 20 seg.

	N° de Testigo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Peso anhidro (gs)	93.87	90.28	92.52	81.1	79.2	80.92	93.43	97.63	94.69	89.73	98.68	105.1
Peso Saturado (gr)	115	111.41	114.02	99.99	97.48	99.37	115.44	120.3	116.02	110.61	120.98	128.61
X _{bs} max [contenido de humedad máximo en base seca]	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22

Tabla 1.- Distribución de pesos de las muestras testigo de material adsorbente empleadas y contenido de humedad máximo.

Proceso de adsorción: Debido a la dificultad técnica de monitorear la variación de peso del panel completo de SG, se construyeron 12 testigos con material adsorbente. Para la construcción de los mismos se empleó tela metálica plegada a modo de sobre de 0.15 m x 0.07 m con una capacidad para alojar en su interior aproximadamente 100g de SG cada uno. Estos testigos prestan una doble función, por un lado permitir el monitoreo de la ganancia de agua durante la adsorción y por el otro, permitir el análisis de la distribución del flujo de aire a través del panel de SG. Con este objetivo, los testigos se distribuyeron uniformemente en diferentes puntos del área transversal del panel tal como se muestra en el esquema de la Fig.3 El peso anhidro de los testigos se determinó manteniéndolos en una mufla durante 72 hs. a una temperatura entre 88 y 100 °C. La Tabla 1 presenta la distribución de pesos anhidro y saturados de las muestras testigo utilizadas así como su contenido de humedad (X_{bs}) máximo expresado en base seca.

Debido a que para realizar las pesadas de los testigos durante los ensayos se debía abrir la unidad de Adsorción-Regeneración con la consiguiente perturbación que esta acción introduce en el proceso, se realizaron pesadas solo en tres o cuatro oportunidades a lo largo de las corridas. Para la medición de peso se utilizó una balanza digital Mettler PJ 3000 con sensibilidad de 0.01g.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

A efectos de analizar la influencia del caudal de aire sobre la cantidad de agua adsorbida en el panel se efectuaron ensayos para caudales de aire comprendidos entre 260kg/h y 1000 kg/h como se muestra en la tabla 2.

La humedad absoluta se determinó a partir de la ecuación (1); donde Ψ representa la humedad relativa, X_{sat} (humedad absoluta de saturación) que se calculó a partir de datos tabulados en la bibliografía mediante una regresión en función de la temperatura, obteniéndose la ecuación (2). Las humedades absolutas del aire a la entrada (X_e) y salida (X_s) del panel de silica gel se determinan a partir de los valores experimentales de humedad relativa de entrada (Ψ_e) y humedad relativa de salida (Ψ_s) y temperatura de entrada del aire (T_e) y temperatura de salida del aire (T_s) del panel de silica gel, mediante las ecuaciones (3) y (4).

$$X = \Psi * X_{sat} \quad (1)$$

$$X_{sat} = 4,6193 * e^{0,0582 * T} \quad (2)$$

$$X_e = 4,6193 * e^{0,0582 * T_e} * \Psi_e / 100 \quad (3)$$

$$X_s = 4,6193 * e^{0,0582 * T_s} * \Psi_s / 100 \quad (4)$$

En la tabla 2 se exponen los resultados más significativos de las experiencias realizadas con el dispositivo de adsorción:

Ensayo	Adsorción		ΔX (aire) g(agua)/kg(aire)		ΔT (°C)	Caudal de aire (Kg/h)	Agua adsor 1ª hr en Kg	E acum (kJ)	Q_{ads} (KW)
	Inicio	Final	Inicio	Final					
e11/12/06	18:00	20:30	1,24	0,77	7	700	0,493	10427	1,02
e20/03/07	15:50	19:00	1,34	0,90	7	900	0,931	13190	0,75
e29/08/07	17:00	19:05	2,31	0,92	5,6	1000	1,34	11638	1,56
e08/08/07	17:07	19:00	2,88	2,26	5	260	0,54	5134	0,36
e19/04/07	17:20	20:30	1,56	0,75	3	1000	1,3	3544	0,84

Tabla 2.-Parámetros determinados en los diferentes ensayos.

Ensayo 11/12/06

El ensayo 11/12/2006 presenta la particularidad de que el panel de silica gel contaba con una máscara frontal de chapa con ranuras de dimensiones y formas tales que se pretendía lograr una flujo uniforme del aire a través del área del panel. Esta máscara estaba situada en el espacio comprendido entre el panel y el cilindro contenedor de la unidad de Regeneración/Adsorción y a igual distancia de ambos (~0.05 m de cada uno). El caudal registrado para este ensayo fue de 700 Kg/h. El calor liberado por el silica gel durante el proceso de adsorción Q_{ads} se calculó a partir de la variación de temperatura que experimenta el aire entre la entrada y salida del panel de silica gel (ΔT), el caudal de aire (m) y el calor específico a presión constante (C_p), ec. 5.

$$Q_{ads} = m * c_p * \Delta T = 700 \frac{kg}{h} * 1,009 \frac{kJ}{kg^{*}C} * 5,2 \frac{^{\circ}C * h}{3600 seg} = 1,02 kW \quad (5)$$

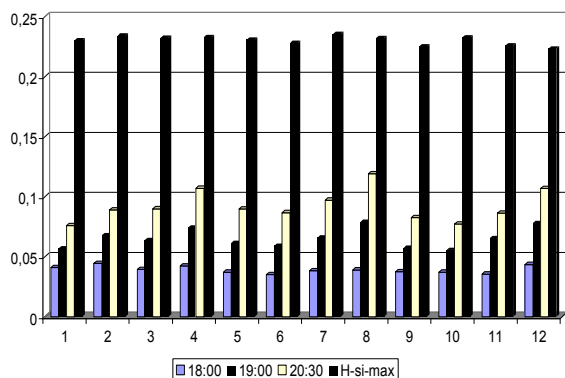


Fig.4.- Proceso de adsorción de los testigos

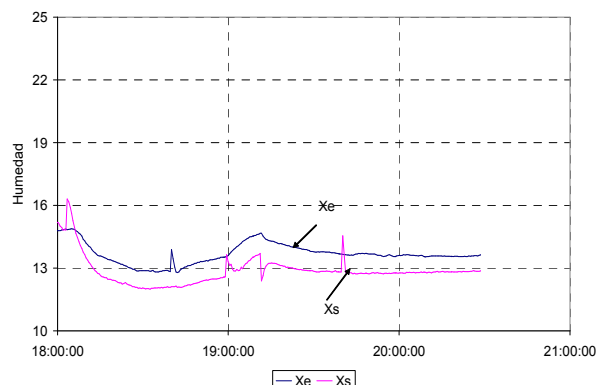


Fig.5.- Variación de la humedad absoluta del aire a la entrada y salida en el panel de silica gel

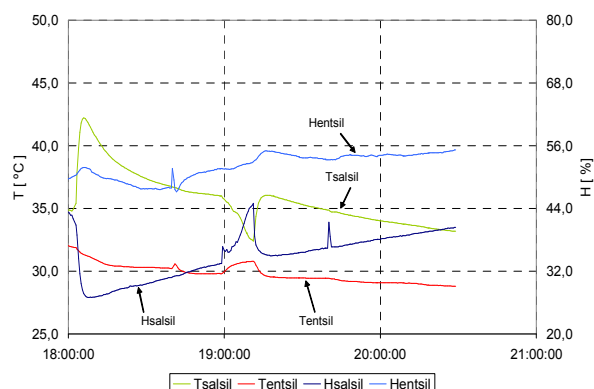


Fig.6.- Manifiesta las variaciones de temperatura y humedad relativa de entrada y salida del aire en el panel de silica gel

La Fig. 4 describe el proceso de adsorción de los testigos a medida que transcurre el tiempo, donde la columna más alta representa el máximo de adsorción posible que pueda tener el silica gel.

La Fig. 5 indica la variación de la humedad absoluta del aire a la entrada y salida del panel de silica gel, durante el proceso de adsorción.

La Fig. 6 manifiesta las variaciones de temperatura y humedad relativa de entrada y salida del aire en el panel de silica gel. Como se observa en la gráfica la temperatura de entrada al panel de silica gel es de aproximadamente 30°C, lo cual influye de manera adversa en el proceso de adsorción de la humedad del aire.

Nota: Las perturbaciones que se observan en las distintas gráficas se deben a la detención del proceso de adsorción a fin de realizar el procedimiento de pesaje de los testigos.

Ensayo 20/03/07

Para la realización de dicho ensayo, se retiró la máscara frontal de chapa con ranuras, con lo cual el caudal aumento a 900 Kg/h.

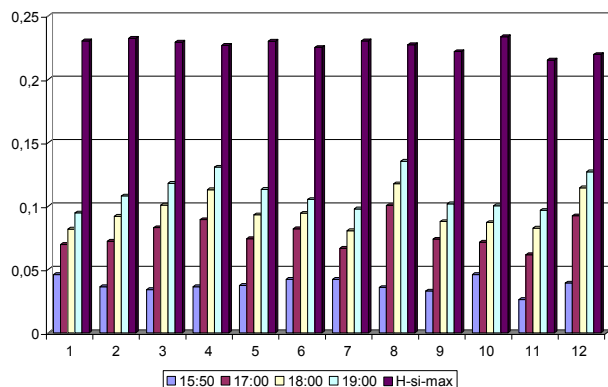


Fig.7.- Proceso de adsorción de los testigos

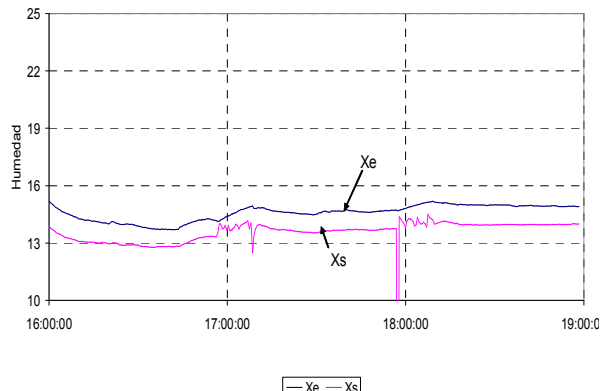


Fig.8.- Variación de la humedad absoluta del aire a la entrada y salida en el panel de silica gel

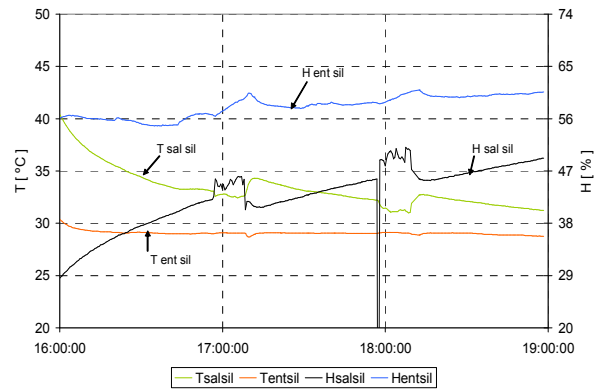


Fig.9.- Manifiesta las variaciones de temperatura y humedad relativa de entrada y salida del aire en el panel de silica gel

De las gráficas anteriores se pueden obtener las siguientes conclusiones:

A pesar de lograrse una regeneración del silica gel del orden promedio del 4% de humedad relativa (fig.7), la diferencia de humedad absoluta entre la entrada y salida del aire en el panel de silica gel es aproximadamente de 1 g (agua)/Kg (aire seco) (Fig. 8), lo cual puede atribuirse al elevado caudal y elevada temperatura de entrada al panel (Fig. 9).

Ensayo 19/04/07

La parte inferior del panel de silica gel por donde ingresa el aire contenía una chapa perforada, lo cual producía una pérdida de carga, al retirarse la misma el caudal de ensayo paso de 900 kg./h a 1000 kg./h.

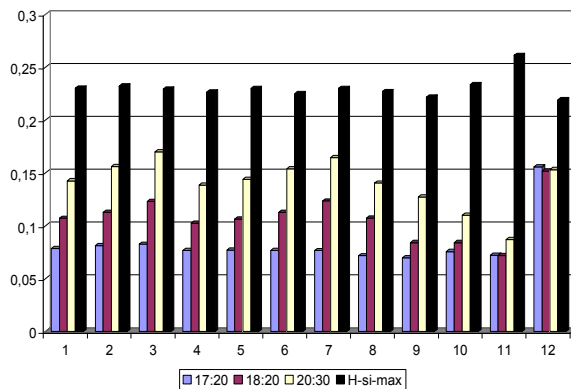


Fig.10.- Proceso de adsorción de los testigos

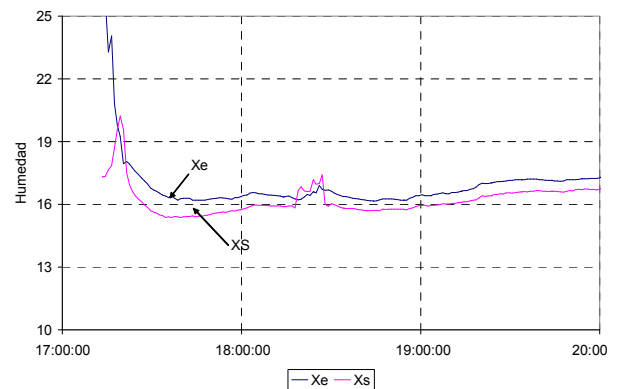


Fig.11.- Variación de la humedad absoluta del aire a la entrada y salida en el panel de silica gel

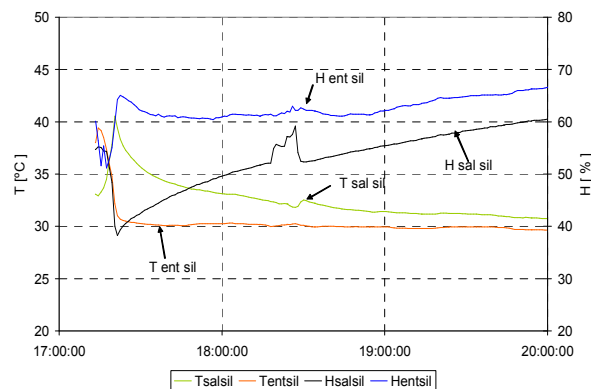


Fig.12.- Manifiesta las variaciones de temperatura y humedad relativa de entrada y salida del aire en el panel de silica gel

Ensayo 29/08/07

El presente ensayo se realizó para un caudal de 1000 Kg/h. Al panel que contiene el silica gel se le realizó el cambio de sellamiento en los laterales como en la parte inferior por otro de mayor espesor, lográndose un mejor aislamiento entre los circuitos de regeneración y adsorción. La regeneración del silica gel para este ensayo se realizó de igual forma que en el ensayo 08/08/07.

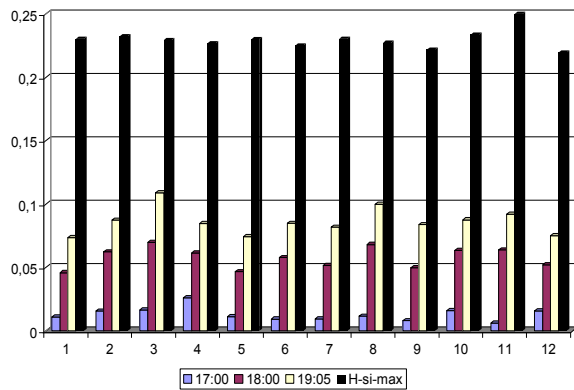


Fig.13- Proceso de adsorción de los testigos

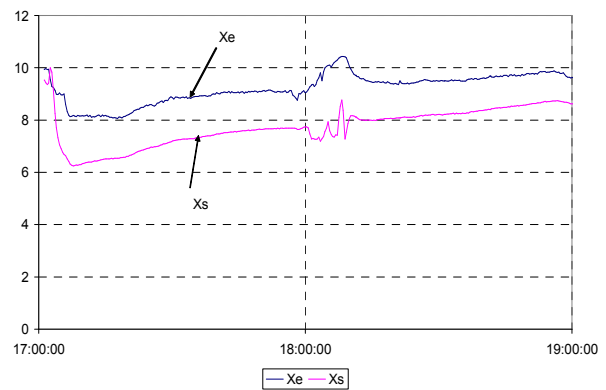


Fig.14.- Variación de la humedad absoluta del aire a la entrada y salida en el panel de silica gel

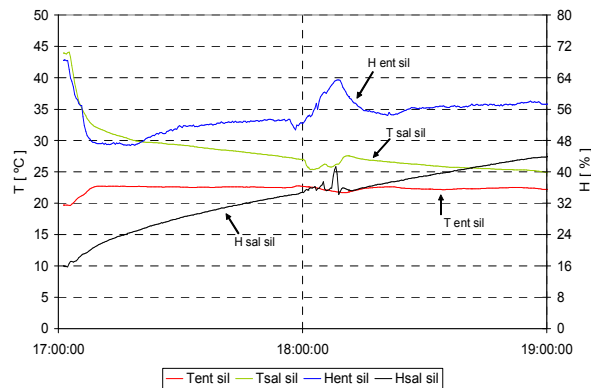


Fig.15.- Manifiesta las variaciones de temperatura y humedad relativa de entrada y salida del aire en el panel de silica gel

Ensayo 08/08/07

Dicho ensayo se realizó para un caudal de 260 Kg/h, lo cual se obtuvo obstruyendo el conducto de aspiración que se encuentra unido al ventilador de impulsión. Debido a la baja radiación solar para esta temporada aproximadamente 600W/m^2 , se adicionó al circuito del colector solar un sistema de resistencias eléctricas (Potencia: 2000 W), a fin de lograr la cantidad de calor necesaria para la regeneración del silica gel.

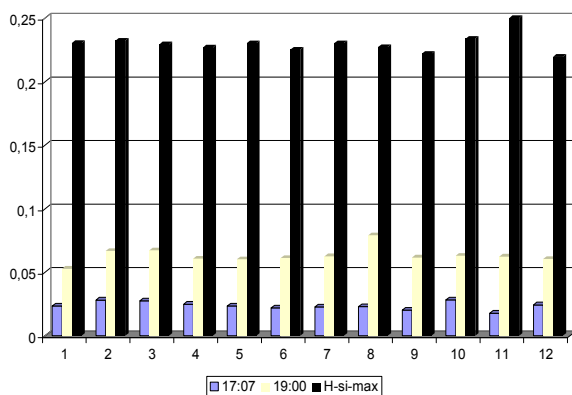


Fig.17- Proceso de adsorción de los testigos

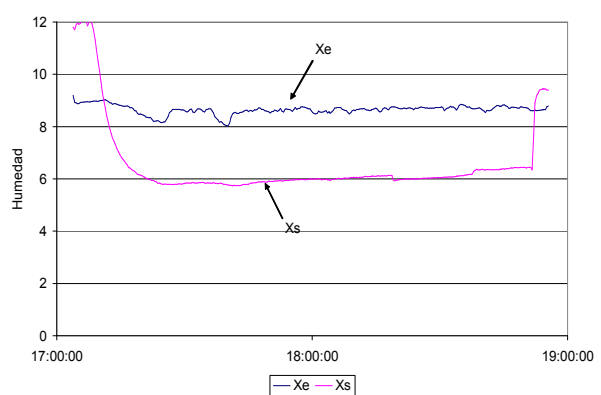


Fig.18.- Variación de la humedad absoluta del aire a la entrada y salida en el panel de silica gel

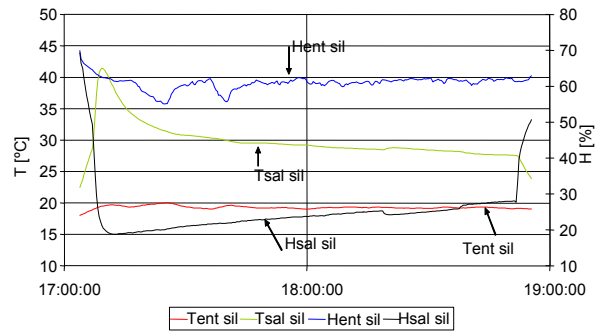


Fig.19- Manifiesta las variaciones de temperatura y humedad relativa de entrada y salida del aire en el panel de silica gel

En la Fig. 18 se puede observar que la diferencia entre las humedades absolutas de entrada y salida del aire en el panel de silica gel es mayor respecto a los ensayos anteriores. Este logro se debe a diversas condiciones a saber:

- a) en la Fig. 17 se observa una regeneración de los testigos del 2% de humedad relativa referida en base seca, valor no alcanzado en los otros ensayos.
- b) el caudal de aire de trabajo es de 260 Kg/h, menor que en los ensayos anteriores.
- c) la temperatura de entrada del aire al panel de silica gel es de aproximadamente de 20°C, lo cual mejora el proceso de adsorción.

A continuación se presentan las gráficas correspondientes de las variaciones entre la humedad absoluta de salida y de entrada del aire para cada ensayo.

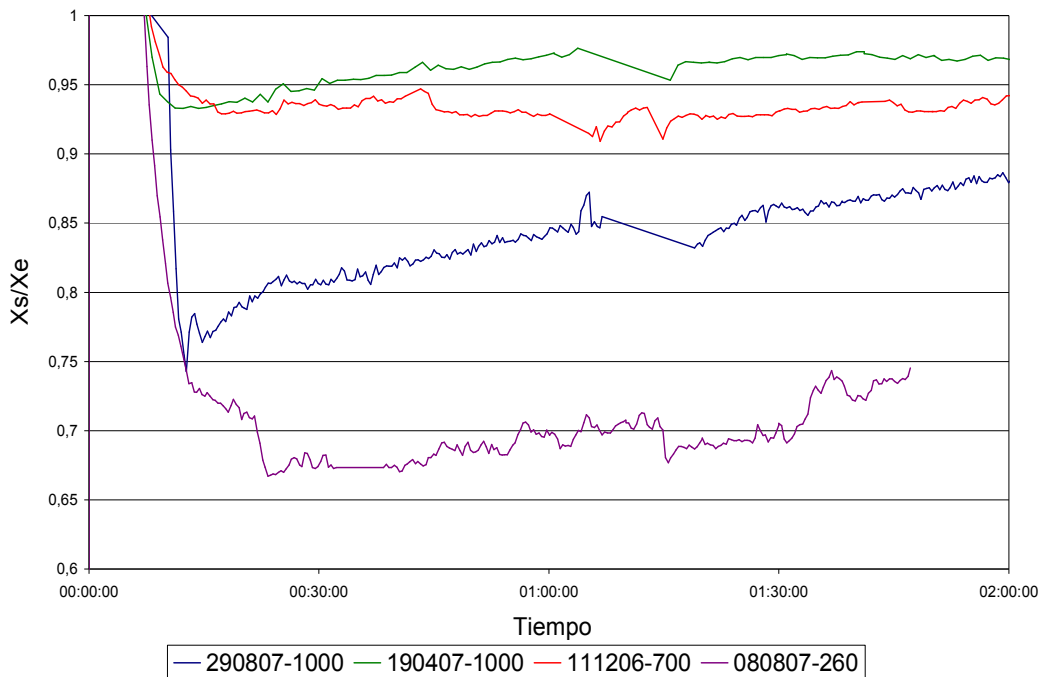


Fig.20.- Comparación de gráficas de X_s/X_e para diferentes caudales

El sistema de climatización opera mejor cuanto menor es la relación de humedades absolutas entre la salida y la entrada, habiéndose establecido una operación aceptable para una relación de 0,85. En la Fig. 20 se presenta la comparación de las evoluciones de las relaciones de humedades absolutas para caudales de 260kg/h, 700kg/h y 1000kg/h.

Para los ensayos efectuados antes de la optimización del dispositivo (11/12/06, 19/04/07 y 08/08/07) se observa que al aumentar el caudal aumenta la relación desde aproximadamente 0,7 para 260kg/h hasta 0,95 para 1000kg/h. la principal causa de este comportamiento es que el aire pasa a mayor velocidad por el panel, es decir se obtiene un tiempo de residencia menor. También influyen el grado de regeneración del panel al inicio y la temperatura de entrada al panel. Si se comparan los resultados obtenidos antes y después de la optimización (29/08/07) para igual caudal (1000kg/h) se nota que la relación disminuye de 0,95 a 0,82; este último valor es aceptable para la operación de la planta de climatización.

CONCLUSIONES

Se efectuó el ensayo y la optimización del panel de adsorción de la planta piloto de climatización por adsorción humidificación, logrando relaciones de humedades absolutas entre salida y entrada de aproximadamente 0.85.

La diferencia de X (Humedad Absoluta) entre la entrada y salida del aire al panel de silica gel es mayor, para las siguientes condiciones: a) bajos caudales, b) temperatura de entrada al panel de silica gel aproximadamente de 20°C, c) regeneración del silica gel del 2% de humedad relativa referida en base seca.

Al dispositivo de ensayo se le realizaron diferentes modificaciones. Como consecuencia de las mismas se obtuvo como máximo diferencias de humedad absoluta entre la entrada y la salida de 2,88g (agua)/Kg (aire seco), por lo que se continuará en el desarrollo de dicho dispositivo, a fin de obtener mejores resultados.

REFERENCIAS

- Builes D. (2000). Modelo Matemático para ruedas deshumidificadoras (Magíster en Sistemas Energéticos), Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Formación Avanzada. Maestría en Sistemas Energéticos. Medellín.
- Bula Silvera A y Juvinao J. (2004). Comportamiento del gel de sílice como filtro deshumidificador en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, junio, número 031. Medellín, Colombia, pp. 73-83.
- Builes D y Chejne F (2004). Acondicionamiento de aire utilizando ruedas deshumidificadoras. Instituto de Energía y Termodinámica. Universidad Pontificia Bolivariana. Programa Iberoamericano de Ciencia Y Tecnología para el desarrollo. Jornadas Iberoamericanas sobre el enfriamiento solar .CYTED. Cartagena de Indias, Colombia.
- Simonson C y Besant R. (1997). Heat and Moisture Transfer in Desiccant Coated Rotary Energy Exchangers, Part I: Numerical Model, HVAC & R. Research: 3 (4), 325-350.
- Vian A y Ocón J. (1957). Elementos de Ingeniería Química, 1ª edición, pp. 668-687. Madrid.

ABSTRACT

We expose the experimental results of an air humidity adsorption process in a panel filled with silica gel. This silica gel panel is the main component of a pilot plant for solar acclimatation by adsorption and humidification. Temperature and relative humidity values of the entry and exit air passing through the device were recorded to study the process. Tests for air flows between 260 kg/h and 1000 kg/h were realized. In order to optimize the device performance, air infiltrations and scapes were eliminated so we were able to obtain absolute humidity variations of $2,31 \times 10^{-3}$ kg (water)/kg (dry air) for an air flow of 1000 kg/h.

Keywords:: Adsorption, silica gel, acclimatation.